

滇西北甯哥正长岩体成因: 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学证据*

姜丽莉^{1,2} 薛传东^{3**} 侯增谦² 向坤³JIANG LiLi^{1,2}, XUE ChuanDong^{3**}, HOU ZengQian² and XIANG Kun³

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

3. 昆明理工大学地球科学系, 昆明 650093

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 10083, China

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Department of Earth Sciences, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2015-03-15 收稿, 2015-06-28 改回.

Jiang LL, Xue CD, Hou ZQ and Xiang K. 2015. Petrogenesis of the Bengge syenites, northwestern Yunnan: Geochemistry, geochronology and Hf isotopes evidence. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (11): 3234–3246

Abstract The host rocks of the Bengge gold deposit include biotite-pyroxene syenite, biotite syenite and porphyry syenite. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results indicate that the biotite pyroxene syenite and the biotite syenite crystallized at 213.8 ± 2.2 Ma and 219.1 ± 4.7 Ma, respectively, which is located within the arc-like magmatism period deduced from the Indosinian subduction of the Garze-Litang oceanic crust. Geochemically, the syenites have very high potassium- and alkaline-contents, and are of shoshonitic series. They are characterized by high $Mg^\#$, Zr/Nd ratio, and Ni-, Co-contents, and enriched in LREE and large ion lithophile elements and depleted in the high field strength elements. The $\varepsilon_{Hf}(t)$ of the biotite pyroxene syenite and biotite syenite mostly range from -2 to $+2$. These features suggest the syenites are derived from partial melting of an enrichment mantle which has been metasomatized by the fluid derived from the dehydration of the subducted oceanic slab. Their corresponding t_{DM2} (Hf) model ages (978 ~ 1317 Ma and 998 ~ 1611 Ma) are older than the crystallization age, combining with the inherited zircon age information of Late Palaeozoic to Proterozoic (510 ~ 534 Ma, 598 ~ 945 Ma and 1096 ~ 1206 Ma), indicating crustal contamination during magma evolution. This magma then were likely formed in an extensional back-arc setting related with a slab break-off resulting from the westward subduction of the Garze-Litang oceanic crust in the Late Triassic.

Key words Syenite; Geochemistry; Geochronology; Hf isotopes; Bengge, northwestern Yunnan

摘要 滇西北甯哥金矿区赋矿岩石类型主要为黑云辉石正长岩、黑云母正长岩及正长斑岩。锆石 LA-ICP-MS 定年结果表明黑云辉石正长岩和黑云母正长岩的结晶年龄分别为 213.8 ± 2.2 Ma 和 219.1 ± 4.7 Ma, 形成于印支期甘孜-理塘洋向西俯冲时期。岩石地球化学分析表明三类岩石均高钾富碱, 属于钾玄质系列, 富集 LREE 和大离子亲石元素 (Sr、K、Rb、Ba、Th), 亏损高场强元素 (如 Nb、Ta、Hf、Ti 等), 具有高的 $Mg^\#$ 、Zr/Nd 比值、Cr 和 Ni 含量, 黑云辉石正长岩和黑云母正长岩锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值多集中于 $-2 \sim +2$ 之间, 显示源区为俯冲板片物质交代的富集地幔。二阶段 Hf 模式年龄 (978 ~ 1317 Ma 和 998 ~ 1611 Ma) 远大于结晶年龄, 结合从黑云母正长岩的部分锆石中获得 510 ~ 534 Ma、598 ~ 945 Ma 和 1096 ~ 1206 三组晚古生代-元古代的年龄信息, 显示岩浆在上升侵位的过程中经历了壳源物质的混染。推测此次岩浆活动可能与晚三叠世甘孜-理塘洋向西俯冲, 大洋板片断离, 形成弧后拉张作用相关。

关键词 正长岩; 地球化学; 年代学; Hf 同位素; 滇西北甯哥

中图法分类号 P588.122; P597.3

* 本文受 973 项目 (2015CB452601) 和国家自然科学基金青年基金项目 (U0933605) 联合资助。

第一作者简介: 姜丽莉, 女, 1988 年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: Jasminelily31204@aliyun.com

** 通讯作者: 薛传东, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事矿床地质及渗流动力学的教学与研究, E-mail: cdxue001@aliyun.com

甬哥地区位于滇西北香格里拉县小中甸镇,大地构造上处于特提斯-喜马拉雅构造域玉树-义敦弧 (Yang *et al.*, 2012, 2014; Deng and Wang, 2015) 南端中甸弧内。甬哥金矿是云南省地矿局于 20 世纪 80 年代初在该区发现的 1 个金矿点,之后的普查和详查工作中圈定了 30 多个正长(斑)岩体,发现了 20 余条金矿脉,共计储量远景约 10t(曾普胜等, 2000)。因而,甬哥地区被认为是区内金矿的找矿远景区(杨岳清等, 2002),但是由于工作程度低,许多基础地质问题尚未解决,不仅影响了对研究区成矿远景的判断,同时阻碍了建立该区与岩浆-构造系统的时空联系。

现有资料表明,研究区金矿与正长(斑)岩体关系密切,前人对甬哥正长岩体开展了少量年代学和地球化学研究,对其形成时代和构造背景存在较大争议,而且岩石成因及其与金矿成矿作用的关系尚不清楚。李光勋(转引自曾普胜等, 1999)测得甬哥矿区成矿期石英脉顺磁共振年龄为 28.2Ma,有人认为甬哥金矿岩体形成时期与该成矿时期相当,此时义敦弧在青藏高原碰撞造山作用影响下发育逆冲-推覆构造和大规模走滑平移断层,甬哥正长岩的形成与走滑剪切作用密切相关(曾普胜等, 1999, 2000, 2003; 杨岳清等, 2002)。然而,曹殿华等(2007)运用单颗粒锆石稀释法测定甬哥正长岩 U-Pb 年龄为 201.4 ± 8.2 Ma,并认为其形成与印支期甘孜-理塘洋向西俯冲作用晚期构造机制由挤压转换成拉张相关。鉴于此,本文对甬哥地区开展了比较详细的野外调查,基本确定了该区 8 号岩体的岩石类型,并系统采集岩石样品,开展岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素等分析测试,结合前人工作,探讨该区岩浆起源、岩石成因及构造背景,旨在为下一步研究岩体与成矿间的联系提供基础地质条件约束,同时建立该区与中甸弧岩浆-构造演化时空联系。

1 区域地质背景

研究区地处青藏高原东缘玉树-义敦弧最南端中甸弧内,北东接松潘-甘孜褶皱带,西部经金沙江缝合带与羌塘地块相邻(Burchfiel and Chen, 2012)(图 1a),东、西分别以甘孜-理塘缝合带和金沙江缝合带为界(Roger *et al.*, 2008, 2010; Wang *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2014)(图 1b)。Reid *et al.* (2007)以格咱断裂为界将义敦弧分为东西两部分。义敦弧西部地区(中咱地块)出露最古老古生代沉积岩可与扬子板块西部古生代地层相对比(Deng *et al.*, 2014a, b),因此,前人认为中-晚古生代甘孜-理塘洋打开(张能德等, 1998; 侯增谦等, 2004; Leng *et al.*, 2012),中咱地块从扬子板块西缘分离。随着中-晚三叠世甘孜-理塘洋向西俯冲消减速(莫宣学等, 1993; 侯增谦等, 2004; Deng *et al.*, 2014a, b),至晚三叠世晚期洋盆关闭,义敦弧先后经历了印支期俯冲造山作用(237~206Ma)、燕山期弧-陆碰撞(~200Ma)和

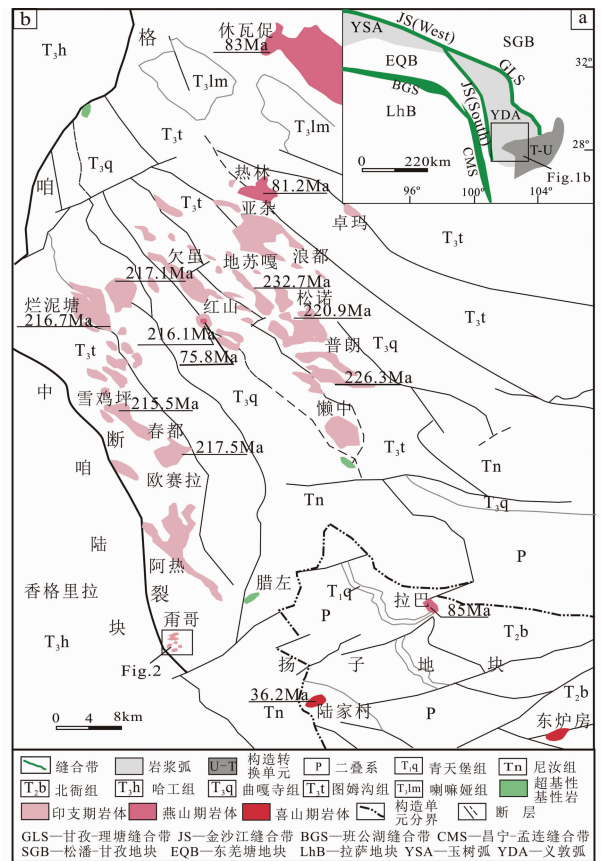


图 1 青藏高原北东缘构造划分图(a,据 Yang *et al.*, 2012)和中甸弧区域地质图(b,据曾普胜等, 2003) 年龄数据来源于李建康等, 2007; 冷成彪等, 2008; 王守旭等, 2008; 薛传东等, 2010; 任江波等, 2011b; 杨宪涛, 2012; 黄肖潇等, 2012

Fig. 1 Tectonic framework of northeastern Tibet Plateau (a, modified after Yang *et al.*, 2012) and geological map of the Zhongdian Arc (b, modified after Zeng *et al.*, 2003)

The age data of the intrusions are from Li *et al.*, 2007; Leng *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2008; Xue *et al.*, 2010; Ren *et al.*, 20011b; Yang, 2012; Huang *et al.*, 2012

喜马拉雅期陆内走滑作用(50~30Ma)三个阶段演化历史,并发育与之相对应三期岩浆活动(侯增谦等, 2004)。义敦弧东部地区出露地层由老到新主要有中三叠统尼汝组(T_n),分布于东南部,岩性主要为板岩夹少量玄武岩、灰岩及凝灰岩;上三叠统曲嘎寺组(T₃q)主要由砂板岩、碳酸盐岩夹中基性火山岩构成;上三叠统图姆沟组(T₃t)主要由砂板岩、灰岩夹酸性火山岩组成;上三叠统喇嘛组(T₃lm)主要为粉砂质板岩和中-细粒石英砂岩。岩相特征为滨海相-陆相环境(杨岳清等, 2002)。

甬哥地区共出露 30 余个大小不一的小岩体(枝、脉)(图 2a),侵位于上三叠统图姆沟组(T₃t)深灰色板岩、粉砂质千枚岩化板岩中,总体呈 SN 向展布。区内构造复杂,发育 NNE

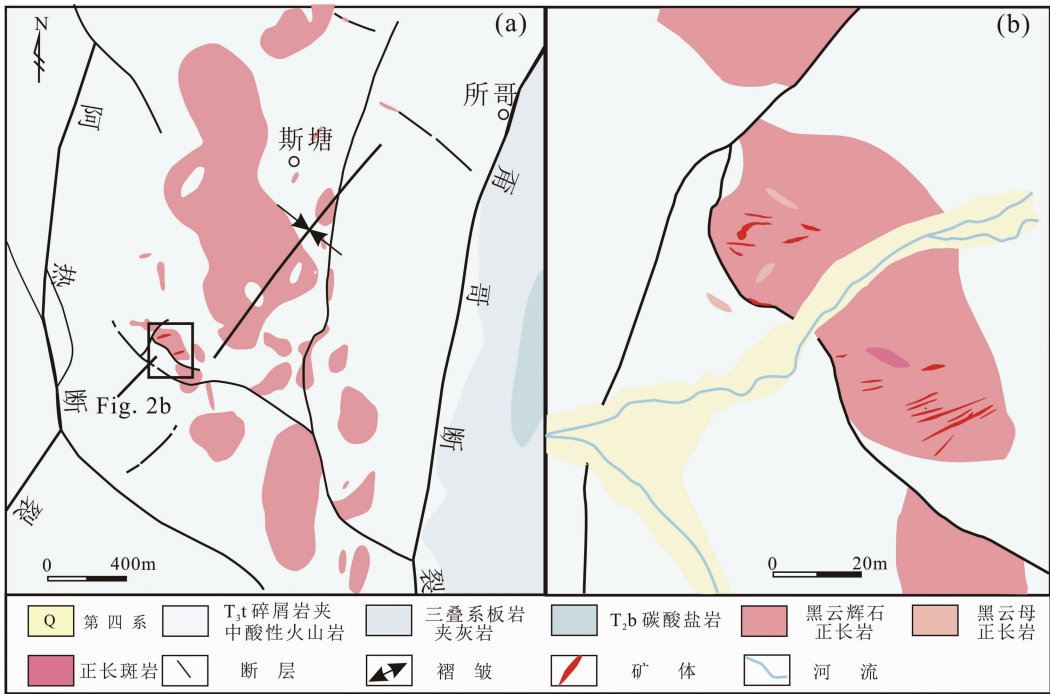


图2 甬哥地区地质简图(a)和甬哥8号岩体地质简图(b,据中国武装警察部队黄金十三支队,1999^①修测)

Fig. 2 Simplified geological map of the Bengge area (a) and simplified geological map of No. 8 pluton in the Bengge area (b)

向甬哥不对称向斜及近 NS 向甬哥断裂和阿热断裂,岩体内发育近 EW 向陡倾裂隙带,构成脉状岩体的主要容矿空间。

矿区已初步控制的金矿体(脉)主要分布在南西部卓玛河一带的8号杂岩体内。根据详细野外调查和岩相学观察,该岩体主要由黑云母正长岩,黑云辉石正长岩和正长斑岩组成。黑云母正长岩和黑云辉石正长岩出露于岩体边缘,而正长斑岩仅少量出露于岩体中心(图2b)。

2 样品描述

本文共 12 件样品,7 件(BGBH1、BGH2、BGBH3、BGH25、BGM2 和 BGM29-2)采自甬哥矿区8号岩体露天采场,5 件(SGB4-H1、SGB4-H2、SGB4-B6、SGB16-H1 和 SGB16-H2)采自钻孔岩芯。其中 10 件元素地球化学样品,分别为 2 件黑云辉石正长岩,4 件黑云母正长岩和 4 件正长斑岩;另外 2 件(BGM2 和 BGM29-2)用于挑选锆石进行 U/Pb 同位素分析。

黑云辉石正长岩呈黑绿带暗紫红色,细-粗粒自形-半自形,主要矿物为钾长石(55%~65%)、辉石(15%~20%)、黑云母(10%~15%)、斜长石(3%~5%)及少量的角闪石,副矿物为磁铁矿、磷灰石、独居石及锆石等(图3c, d)。部分薄片见粗面结构,表现为钾长石微晶呈定向-半定向排列。

黑云母正长岩呈黑绿色,具似斑状结构,似斑晶含量 20%~25%,均为黑云母,基质呈半自形细粒结构,主要矿物为钾长石(45%~55%)和斜长石(25%~30%),副矿物为磷灰石、磁铁矿、锆石等(图3a, b)。

正长斑岩呈浅灰白色,斑状结构,斑晶含量约占 10%~20%,主要为钾长石呈卡氏接触双晶、穿插双晶、十字双晶及信封状双晶,偶见具环带结构斜长石,基质具细粒半自形-他形结构,主要为钾长石(70%~75%)、斜长石(15%~20%)和石英(<4%)(图3e, f)。

3 分析方法

3.1 锆石 U-Pb 同位素定年

样品经过常规粉碎、重液分馏后,通过磁选分选出纯度较高的锆石,在双目镜下精选后将样品锆石放置在玻璃板上用环氧树脂固定、抛光,用反射光、透射光和阴极发光(CL)对比观察单颗粒锆石的内部结构和晶体形态,挑选出晶体形态和内部环带结构发育良好且无包裹体和裂隙的完好锆石进行分析测试。

锆石微区原位微量元素分析在中国科学技术大学 LA-ICP-MS 实验室进行,使用四极杆等离子质谱仪(型号:PerkinElmer Elan DRC II),采用 193nm 波长 GeoLaspro 激光

① 中国人民武装警察部队黄金第十三支队,1999. 云南省中甸甬哥、陆家村一带岩金普查报告

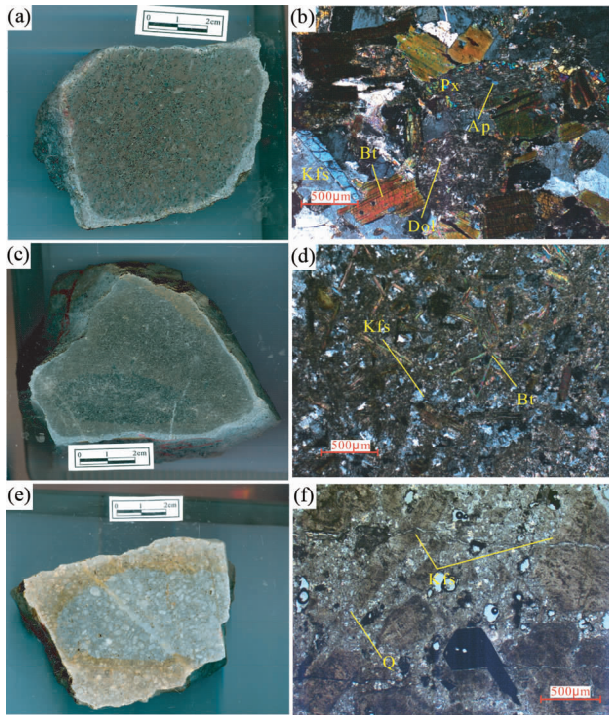


图3 甬哥地区黑云辉石正长岩(a、b)、黑云母正长岩(c、d)和正长斑岩(e、f)手标本及镜下照片

Px-辉石; Bt-黑云母; Kfs-钾长石; Q-石英; Ap-磷灰石; Dol-白云石
Fig. 3 Hand specimen and micro-photographs of the biotite pyroxene syenite (a, b), biotite syenite (c, d) and porphyry syenite (e, f) from the Bengge area

Px-pyroxene; Bt-biotite; Kfs-K-feldspar; Q-quartz; Ap-apelite; Dol-dolomite

系统用于样品的剥蚀进样。本次实验激光束斑直径分别为 $32\mu\text{m}$ 和 $44\mu\text{m}$,激发频率10Hz,总能量密度 $10\text{J}/\text{cm}^2$ 。采用高纯度He作为剥蚀物质的载气,使用标准锆石91500($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $1062.4 \pm 0.4\text{Ma}$)进行分馏校正。详细分析测试过程参见文献(Yuan *et al.*, 2004)。样品测试结果通过Excel软件加载La-Dating@Zrn宏程序进行分析,并采用Isoplot(Ludwig, 2003)软件进行处理。使用 ^{204}Pb 进行普通铅校正,单个测试数据误差为 1σ , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄误差为 2σ 。

3.2 主量、微量和稀土元素分析

采集新鲜、蚀变弱的岩石样品切去表面,将新鲜部分碾磨至200目,送至国家地质实验测试中心进行主量、微量及稀土元素含量分析,主量元素分析采用X荧光光谱法(XRF)完成(Rigaku 3080E-PW4400),分析相对误差低于2%。

微量及稀土元素运用等离子质谱仪完成(TJAPQ-Excell system),分析相对误差低于5%~10%。

3.3 锆石 Hf 同位素分析

锆石原位 Hf 同位素分析利用天津地质矿产研究所

193nm 波长 New Wave 激光剥蚀系统和 Neptune 多接收电感耦合等离子质谱仪(MC-ICP-MS)对经过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析的同一位置上进行,激光斑束直径为 $50\mu\text{m}$ 。测量数据使用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02669$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5886$ 进行校正计算测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值。 ϵ_{Hf} 值计算采用的 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11}\text{a}^{-1}$,现今球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$ 。本次分析过程中,标样 GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为分析结果($2\sigma, n = 14$),与该实验室早期获得的数值在误差范围内一致(耿建珍等, 2011)。采用了 GLITTER 和 ISOPLLOT 分析处理。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

黑云母正长岩中(BGM2)的锆石分为两类:一类无色透明,呈自形-半自形短柱状,锆石颗粒大小在 $40 \sim 200\mu\text{m}$ 之间,长短轴比在 $1 \sim 2$ 之间。发育扇形阴极发光分带(图4a),显示典型岩浆锆石结构特点;另一类多呈圆卵形、不规则状,粒径在 $100 \sim 150\mu\text{m}$ 之间,阴极发光图像显示核-幔结构,有些颗粒核部具振荡环带而幔部未见环带结构,另一些核部不发育环带而幔部见微弱环带。共选29个锆石颗粒进行U/Pb分析测试,其中11个锆石发育扇形环带,锆石U和Th含量变化范围分别在 $301.6 \times 10^{-6} \sim 1689 \times 10^{-6}$ 和 $242.2 \times 10^{-6} \sim 4465 \times 10^{-6}$ 之间(表1),Th/U在 $0.78 \sim 2.75 (>0.4)$ 范围内,属于岩浆成因锆石(Hoskin and Schaltegger, 2003), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $219.1 \pm 4.7\text{Ma}$ (MSWD = 1.8)(图4b),代表黑云母正长岩的结晶年龄。另有13颗发育核-幔结构锆石核部年龄值分布在 $510 \sim 534\text{Ma}$, $598 \sim 945\text{Ma}$ 和 $1096 \sim 1206\text{Ma}$ 之间,具有晚古生代-元古代的年龄信息,可能是岩浆上升侵位过程中捕获围岩中继承锆石。剩余5个锆石没有获得协和年龄。

黑云辉石正长岩(BGM29-2)中的锆石呈短柱状(图4c),多数颗粒具岩浆锆石振荡韵律环带结构,少数颗粒见扇形结构,颗粒大小变化于 $30 \sim 150\mu\text{m}$ 之间。锆石U含量为 $439.0 \times 10^{-6} \sim 1260 \times 10^{-6}$,Th/U为 $0.74 \sim 1.62$ (表1),属于岩浆成因锆石。测定的35个点,其中9个分析点存在明显Pb丢失,未能获得协和年龄,其余26个点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄平均值为 $213.8 \pm 2.2\text{Ma}$ (MSWD = 1.8)(图4d),代表黑云辉石正长岩的结晶年龄。

4.2 主量元素

地球化学分析结果列于表2,黑云辉石正长岩和黑云母正长岩 SiO_2 含量中等($53.81\% \sim 57.02\%$),以高 K_2O ($6.57\% \sim 9.55\%$)和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ($2.8 \sim 15.5$),高 MgO ($3.45\% \sim 5.35\%$)和 $\text{Mg}^\#$ ($\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) \times 100$)($26.8 \sim 47.9$)为特征, Al_2O_3 变化于 $10.75\% \sim 12.16\%$ 间,铝饱和指数(A/CNK)为

表1 甯哥地区黑云母正长岩(BGM2)和黑云辉石正长岩(BGM29-2)锆石 U-Pb 定年分析数据

Table 1 U-Pb analytical data of zircons from the biotite syenite (BGM2) and the biotite pyroxene syenite (BGM29-2) from the Bengge area

测点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值								年龄(Ma)	
	U	Th		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
BGM2-1	451.3	318.2	0.71	0.05915	0.00190	0.67241	0.02368	0.08241	0.00183	0.05278	0.00352	510	11
BGM2-2	600.8	331.0	0.55	0.08107	0.00257	2.14638	0.07526	0.19126	0.00426	0.11953	0.00831	1128	23
BGM2-4	678.4	159.3	0.23	0.07278	0.00235	1.51269	0.05361	0.14975	0.00339	0.09601	0.00658	900	19
BGM2-5	492.9	260.1	0.53	0.07209	0.00232	1.53440	0.05611	0.15373	0.00354	0.10139	0.00743	922	20
BGM2-6	1010	56.65	0.06	0.06970	0.00247	1.09401	0.04273	0.11298	0.00266	0.07288	0.00569	684	16
BGM2-7	522.5	60.52	0.12	0.07544	0.00257	1.57739	0.05873	0.15066	0.00346	0.10092	0.00803	905	19
BGM2-8	304.8	266.9	0.88	0.05225	0.00280	0.24017	0.01333	0.03318	0.00084	0.02244	0.00153	210	5
BGM2-9	430.7	296.2	0.69	0.06138	0.00260	0.83475	0.03727	0.09807	0.00233	0.06713	0.00490	603	14
BGM2-11	188.9	284.6	1.50	0.05962	0.00239	0.80514	0.03423	0.09728	0.00235	0.06586	0.00428	598	14
BGM2-13	326.9	271.0	0.83	0.05367	0.00279	0.26894	0.01431	0.03621	0.00087	0.02576	0.00175	229	5
BGM2-14	508.9	677.4	1.33	0.05020	0.00200	0.25763	0.01064	0.03663	0.00084	0.02475	0.00157	232	5
BGM2-15	768.6	1229	1.60	0.05040	0.00211	0.24013	0.01052	0.03438	0.00078	0.02332	0.00149	218	5
BGM2-16	1232	2470	2.00	0.05003	0.00176	0.24347	0.00973	0.03535	0.00081	0.02406	0.00160	224	5
BGM2-18	1689	4465	2.64	0.04874	0.00168	0.23098	0.00867	0.03404	0.00076	0.02321	0.00157	216	5
BGM2-19	370.8	352.1	0.95	0.05695	0.00338	0.26502	0.01552	0.03372	0.00092	0.02298	0.00154	214	6
BGM2-20	408.4	459.1	1.12	0.08136	0.00253	2.32193	0.07810	0.20565	0.00452	0.13165	0.00855	1206	24
BGM2-21	309.0	242.2	0.78	0.05596	0.00369	0.26553	0.01701	0.03446	0.00095	0.02367	0.00181	218	6
BGM2-22	201.7	37.66	0.19	0.06024	0.00262	0.72077	0.03364	0.08645	0.00231	0.05833	0.00547	534	14
BGM2-24	696.1	1094.2	1.57	0.05158	0.00220	0.24562	0.01118	0.03419	0.00077	0.02335	0.00151	217	5
BGM2-25	1455	4004	2.75	0.05163	0.00183	0.23900	0.00903	0.03341	0.00076	0.02228	0.00148	212	5
BGM2-26	398.9	361.6	0.91	0.07791	0.00258	2.00298	0.07232	0.18531	0.00427	0.11864	0.00804	1096	23
BGM2-27	125.2	152.3	1.22	0.07030	0.00302	1.22052	0.05398	0.12478	0.00293	0.08405	0.00563	758	17
BGM2-28	357.7	194.1	0.54	0.07247	0.00246	1.58752	0.05862	0.15780	0.00357	0.10169	0.00726	945	20
BGM2-29	301.6	305.4	1.01	0.05170	0.00259	0.24776	0.01244	0.03444	0.00085	0.02387	0.00158	218	5
BGM29-2-1	841.4	874.1	1.04	0.04910	0.00125	0.23657	0.00666	0.03490	0.00061	0.02371	0.00046	221	4
BGM29-2-4	884.7	912.2	1.03	0.05164	0.00121	0.24679	0.00666	0.03465	0.00062	0.02399	0.00047	220	4
BGM29-2-6	1122	1417	1.26	0.05108	0.00114	0.23658	0.00618	0.03349	0.00058	0.02333	0.00043	212	4
BGM29-2-8	526.1	506.4	0.96	0.05031	0.00164	0.22680	0.00753	0.03275	0.00065	0.02309	0.00049	208	4
BGM29-2-9	1151	1145	0.99	0.05013	0.00111	0.24643	0.00615	0.03563	0.00061	0.02499	0.00047	226	4
BGM29-2-11	508.9	453.8	0.89	0.05016	0.00136	0.23430	0.00695	0.03388	0.00060	0.02321	0.00048	215	4
BGM29-2-12	1026	1641	1.60	0.05181	0.00136	0.23899	0.00695	0.03342	0.00059	0.02278	0.00042	212	4
BGM29-2-14	1101	1209	1.10	0.05110	0.00122	0.23384	0.00634	0.03318	0.00062	0.02271	0.00047	210	4
BGM29-2-15	1019	1473	1.45	0.05060	0.00135	0.22935	0.00720	0.03279	0.00057	0.02220	0.00042	208	4
BGM29-2-16	771.3	707.8	0.92	0.05097	0.00134	0.24743	0.00747	0.03496	0.00064	0.02476	0.00055	221	4
BGM29-2-17	439.0	324.6	0.74	0.05183	0.00146	0.23819	0.00724	0.03357	0.00061	0.02322	0.00048	213	4
BGM29-2-18	479.2	450.1	0.94	0.05050	0.00144	0.22827	0.00688	0.03273	0.00060	0.02229	0.00049	208	4
BGM29-2-19	858.4	828.1	0.96	0.05026	0.00128	0.23723	0.00656	0.03444	0.00060	0.02447	0.00048	218	4
BGM29-2-20	756.8	1043	1.38	0.04999	0.00133	0.23083	0.00687	0.03346	0.00059	0.02278	0.00046	212	4
BGM29-2-21	817.5	835.2	1.02	0.04890	0.00116	0.23104	0.00624	0.03421	0.00059	0.02367	0.00047	217	4
BGM29-2-22	875.6	1229	1.40	0.05075	0.00137	0.23785	0.00730	0.03390	0.00061	0.02327	0.00045	215	4
BGM29-2-25	1246	1405	1.13	0.04823	0.00113	0.22920	0.00620	0.03441	0.00060	0.02416	0.00046	218	4
BGM29-2-26	855.4	966.2	1.13	0.05064	0.00130	0.23514	0.00667	0.03365	0.00059	0.02315	0.00047	213	4
BGM29-2-27	780.7	969.0	1.24	0.04999	0.00127	0.23631	0.00667	0.03427	0.00061	0.02356	0.00048	217	4
BGM29-2-29	625.3	768.9	1.23	0.04918	0.00139	0.22288	0.00694	0.03285	0.00059	0.02233	0.00047	208	4
BGM29-2-30	1260	1974	1.57	0.04810	0.00114	0.21960	0.00596	0.03306	0.00058	0.02163	0.00041	210	4
BGM29-2-31	577.1	744.9	1.29	0.05089	0.00161	0.24499	0.00808	0.03502	0.00064	0.02392	0.00050	222	4
BGM29-2-32	682.1	767.6	1.13	0.05056	0.00159	0.22884	0.00776	0.03285	0.00060	0.02227	0.00047	208	4
BGM29-2-34	936.2	848.6	0.91	0.05073	0.00132	0.23144	0.00664	0.03307	0.00059	0.02282	0.00048	210	4
BGM29-2-35	604.4	976.8	1.62	0.04974	0.00147	0.22007	0.00701	0.03213	0.00062	0.02130	0.00047	204	4
BGM29-2-36	553.7	587.9	1.06	0.04964	0.00151	0.23216	0.00749	0.03370	0.00064	0.02397	0.00053	214	4

表 2 甯哥地区黑云辉石正长岩、黑云母正长岩和正长斑岩主量元素 (wt%)、微量和稀土元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果Table 2 Contents of major elements (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of the biotite pyroxene syenite, biotite syenite and porphyry syenite from the Bengge area

样品号	BGBH1	BGH29	SGB16-H1	SGB16-H2	BGH2	BGBH3	SGB4-H1	SGB4-H2	BGH25	SGB4-B6
岩性	黑云辉石正长岩		黑云母正长岩				正长斑岩			
SiO ₂	53.81	54.68	57.02	56.74	55.43	56.94	61.22	60.95	66.35	61.37
Al ₂ O ₃	11.33	12.08	12.05	11.90	10.75	12.16	13.88	13.82	13.95	13.36
CaO	5.71	6.19	4.92	5.08	3.40	5.76	2.17	1.93	1.00	2.24
Fe ₂ O ₃	4.16	4.27	0.90	0.91	2.85	1.67	2.92	2.35	1.53	0.53
FeO	3.54	4.17	5.32	5.51	6.68	4.72	1.11	1.69	1.08	3.41
K ₂ O	9.55	7.53	6.61	6.60	7.73	6.57	10.97	10.72	11.60	10.10
MgO	5.25	5.35	3.45	3.78	4.73	4.32	1.25	1.40	0.57	1.50
MnO	0.14	0.14	0.15	0.16	0.13	0.15	0.07	0.08	0.03	0.09
Na ₂ O	1.04	2.08	2.36	2.30	0.50	2.50	0.20	0.20	0.08	0.10
P ₂ O ₅	1.28	1.17	0.77	0.81	1.16	0.95	0.20	0.23	0.14	0.24
TiO ₂	0.76	1.13	0.86	0.86	0.82	0.82	0.48	0.49	0.37	0.43
CO ₂	1.80	0.51	3.69	3.34	2.40	1.97	3.17	3.09	2.66	3.60
H ₂ O ⁺	0.70	0.54	0.96	0.84	1.48	0.84	1.18	1.40	0.70	1.28
LOI	2.05	1.04	4.13	4.10	4.00	2.64	5.12	5.18	2.69	5.32
La	50.7	33.2	45.5	49.5	83.2	57.6	39.0	44.8	27.2	39.8
Ce	93.6	66.0	81.3	89.3	123	103	66.0	77.7	45.0	65.4
Pr	11.0	8.25	9.30	10.4	12.6	11.8	6.73	8.16	4.80	7.19
Nd	44.0	34.5	36.1	40.0	45.0	45.8	25.5	28.9	17.5	26.5
Sm	7.95	6.83	7.06	7.91	7.57	8.55	4.77	5.15	3.24	5.02
Eu	1.54	1.65	1.56	1.67	1.27	1.71	0.78	0.86	0.57	0.91
Gd	6.76	6.13	6.50	7.04	6.26	7.79	4.00	4.61	2.75	4.72
Tb	0.75	0.78	0.78	0.90	0.70	0.88	0.50	0.58	0.41	0.55
Dy	3.26	3.90	4.26	4.63	3.18	4.27	2.63	3.13	2.15	2.93
Ho	0.52	0.66	0.73	0.80	0.59	0.72	0.43	0.49	0.38	0.47
Er	1.35	1.80	2.01	2.11	1.70	2.09	1.27	1.39	1.16	1.26
Tm	0.17	0.24	0.28	0.31	0.24	0.28	0.19	0.22	0.17	0.17
Yb	0.97	1.51	1.74	1.86	1.46	1.72	1.17	1.25	1.16	1.09
Lu	0.15	0.23	0.28	0.30	0.25	0.25	0.19	0.21	0.19	0.19
Ba	7595	3362	4432	4503	5418	4777	5787	6148	4477	5289
Co	24.2	27.6	18.4	16.4	68.4	20.6	6.52	6.63	3.50	6.67
Cr	88.5	106	55.5	68.7	90.4	66.6	11.0	11.9	9.21	20.1
Cu	128	45.5	104	67.1	105	27.0	43.3	95.7	98.8	53.8
Ni	21.4	32.6	21.7	20.3	22.1	24.3	4.65	4.59	3.07	9.26
Sr	1787	1087	1432	1518	717	1133	790	738	346	729
Th	6.79	12.0	17.5	17.9	16.8	18.3	17.2	12.8	24.2	13.3
V	238	239	184	180	213	205	124	130	77.8	100
Zn	73.5	81.5	86.3	89.1	120	67.9	31.7	47.2	33.3	34.6
Pb	15.8	20.7	8.66	10.4	6.29	17.6	17.8	26.0	17.6	18.4
Rb	249	223	213	233	256	164	224	228	245	236
Nb	7.10	16.8	19.4	20.3	17.5	23.2	18.7	19.6	24.5	19.9
Ta	0.37	1.11	1.26	1.36	1.16	1.40	1.29	1.41	1.79	1.26
Zr	155	227	250	237	220	221	189	126	283	143
Hf	4.16	5.92	6.56	6.87	5.96	6.31	5.32	3.95	7.91	4.19
U	0.71	2.89	4.13	4.66	7.09	4.93	4.77	3.46	6.69	3.36
Ga	14.0	15.1	15.8	15.6	17.9	15.8	15.1	15.2	15.0	12.9
Y	12.8	16.9	18.9	20.6	14.9	18.6	11.4	13.5	10.2	12.1
Sc	35.6	33.7	23.5	23.8	30.1	27.0	12.6	12.1	5.49	12.6

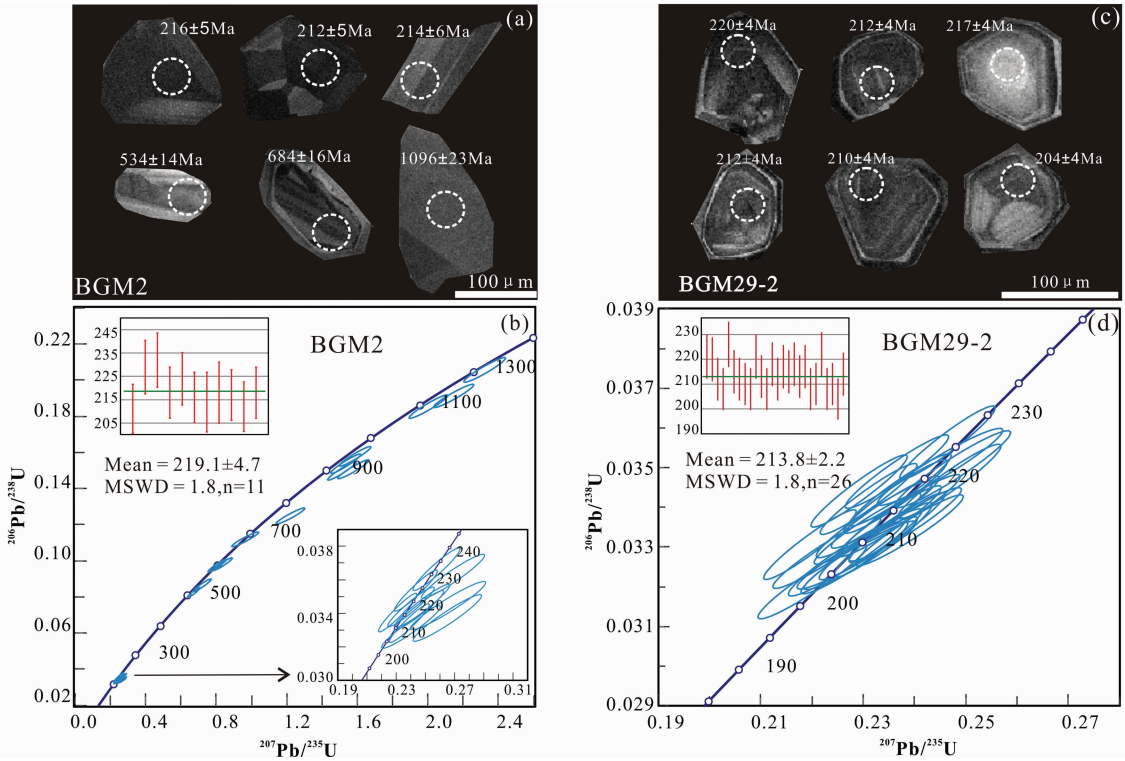


图4 甬哥地区黑云母正长岩(BGM2)和黑云辉石正长岩(BGM29-2)锆石阴极发光图像及U-Pb年龄协和图
白色虚线:U-Pb年龄分析点

Fig.4 Cathodoluminescence images and U-Pb concordia diagrams of zircons from the biotite syenite (BGM2) and the biotite pyroxene syenite (BGM29-2), respectively, from the Bengge area
White dotted line: U-Pb age analysis spots

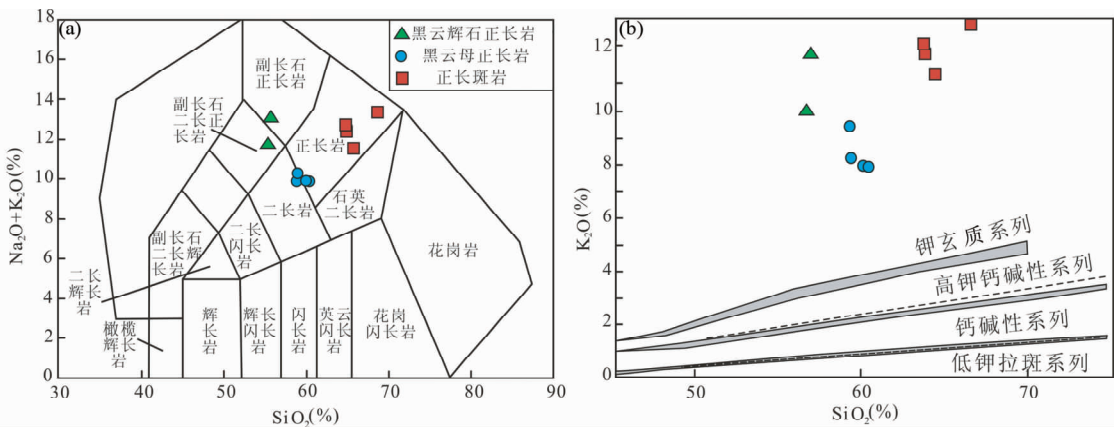


图5 甬哥岩体TAS图(a)和 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图(b)

Fig.5 TAS diagram (a) and $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram (b) of the Bengge complex pluton

0.70~0.92,属偏铝质岩石,里特曼指数5.0~9.7,显示碱性系列特点,在TAS分类图(图5a)中落入副长石正长岩范围内,在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解(图5b)中,样品位于钾玄质系列区域。

与黑云母正长岩和黑云辉石正长岩相比,正长斑岩具有更高的 SiO_2 (60.95%~66.35%) and K_2O (10.10%~

11.60%),而 MgO (0.57%~1.50%) and Mg 值(20.3~27.6)明显降低; Al_2O_3 略微升高(13.36%~13.95%),铝饱和指数为1.04~1.09,显示过铝质岩石特征。TAS图上(图5a)位于正长岩区域内,在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解中(图5b),样品均落入钾玄质系列区域。

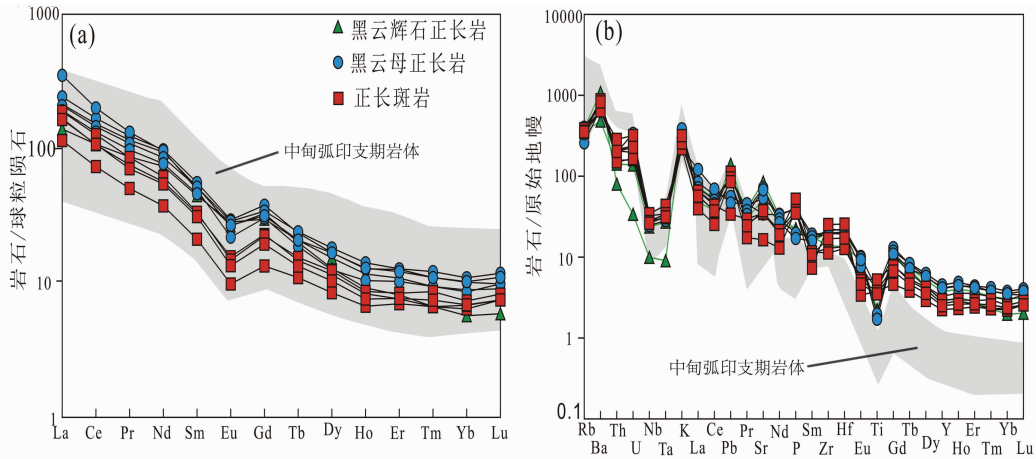


图 6 甬哥岩体球粒陨石标准化稀土元素配分模式图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

印支期岩体数据来源于林清茶等, 2006; 任江波等, 2011a, b; 黄肖潇等, 2012

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagrams (b) of the Bengge complex pluton (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

The data of Indosinian plutons of Zhongdian arc are from Lin *et al.*, 2006; Ren *et al.*, 2011a, b; Huang *et al.*, 2012

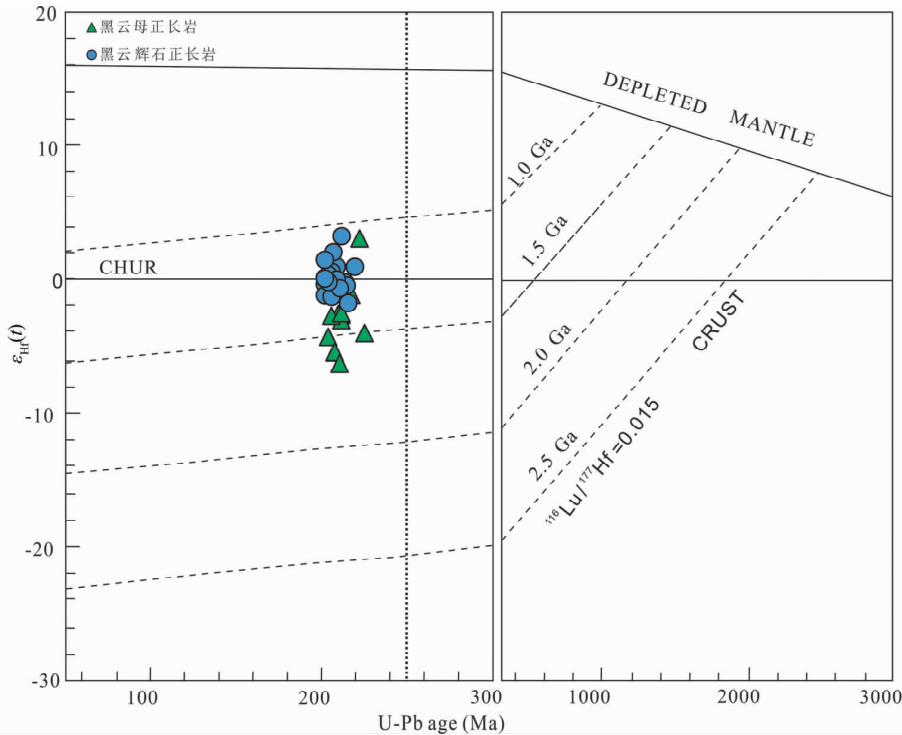


图 7 甬哥地区黑云辉石正长岩和黑云母正长岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 相关图解

Fig. 7 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t plot of the biotite pyroxene syenite and the biotite syenite of the Bengge complex pluton

4.3 稀土元素和微量元素

甬哥正长岩体稀土元素的分析结果列于表 2, 由表可知, 黑云辉石正长岩、黑云母正长岩和正长斑岩中稀土元素总量分别在 $165.7 \times 10^{-6} \sim 222.7 \times 10^{-6}$ 、 $197.4 \times 10^{-6} \sim 287.0 \times$

10^{-6} 和 $106.7 \times 10^{-6} \sim 177.5 \times 10^{-6}$ 之间, $\Sigma \text{LREE} / \Sigma \text{HREE}$ 比值分别为 4.68 ~ 7.81、5.10 ~ 9.31 和 5.29 ~ 6.56。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值分别为 15.8 ~ 37.5、18.8 ~ 40.9 和 16.8 ~ 26.2, 均表现出轻稀土强烈富集、重稀土亏损的特征。经球粒陨石标准化后的稀土元素配分模式 (图 6a), 为明显的右倾平滑曲

表3 甯哥黑云母正长岩和黑云辉石正长岩 Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of the biotite syenite and the biotite pyroxene syenite from the Bengge area

测点号	Age(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
BGM2. 8	210	0.0637	0.0017	0.282546	-7.98	0.000026	-3.61	1017	1476	-0.95
BGM2. 13	229	0.0844	0.0024	0.282757	-0.55	0.000026	4.12	729	998	-0.93
BGM2. 14	232	0.0666	0.0017	0.282542	-8.13	0.000018	-3.30	1025	1474	-0.95
BGM2. 15	218	0.1481	0.0039	0.282599	-6.10	0.000020	-1.88	1001	1372	-0.88
BGM2. 16	224	0.1721	0.0045	0.282643	-4.56	0.000025	-0.31	951	1277	-0.86
BGM2. 18	216	0.0767	0.0021	0.282595	-6.24	0.000018	-1.80	956	1366	-0.94
BGM2. 19	214	0.0687	0.0019	0.282512	-9.20	0.000025	-4.77	1072	1553	-0.94
BGM2. 21	218	0.0740	0.0021	0.282580	-6.78	0.000026	-2.29	979	1399	-0.94
BGM2. 24	217	0.1239	0.0032	0.282490	-9.96	0.000023	-5.65	1142	1611	-0.91
BGM2. 25	212	0.0977	0.0024	0.282595	-6.25	0.000022	-1.94	967	1371	-0.93
BGM2. 29	218	0.0645	0.0018	0.282595	-6.26	0.000022	-1.73	949	1363	-0.95
BGM29. 2. 4	220	0.0321	0.0008	0.282658	-4.03	0.000022	0.68	838	1211	-0.97
BGM29. 2. 6	212	0.0290	0.0008	0.282701	-2.49	0.000014	2.05	776	1118	-0.98
BGM29. 2. 8	208	0.0259	0.0007	0.282675	-3.41	0.000016	1.06	811	1178	-0.98
BGM29. 2. 9	226	0.0431	0.0012	0.282690	-2.90	0.000019	1.89	800	1139	-0.96
BGM29. 2. 11	215	0.0268	0.0008	0.282696	-2.69	0.000024	1.92	783	1128	-0.98
BGM29. 2. 12	212	0.0390	0.0011	0.282688	-2.98	0.000018	1.51	802	1152	-0.97
BGM29. 2. 14	210	0.0425	0.0012	0.282682	-3.17	0.000019	1.27	812	1166	-0.96
BGM29. 2. 15	208	0.0593	0.0017	0.282665	-3.79	0.000024	0.55	847	1210	-0.95
BGM29. 2. 16	221	0.0194	0.0006	0.282649	-4.35	0.000017	0.42	844	1229	-0.98
BGM29. 2. 17	213	0.0319	0.0009	0.282730	-1.50	0.000017	3.05	739	1055	-0.97
BGM29. 2. 18	208	0.0204	0.0006	0.282636	-4.81	0.000025	-0.32	863	1266	-0.98
BGM29. 2. 20	212	0.0438	0.0011	0.282632	-4.95	0.000020	-0.45	881	1277	-0.97
BGM29. 2. 22	215	0.0517	0.0013	0.282669	-3.63	0.000021	0.90	832	1193	-0.96
BGM29. 2. 25	218	0.0414	0.0012	0.282763	-0.30	0.000020	4.32	695	978	-0.97
BGM29. 2. 27	217	0.0389	0.0010	0.282647	-4.42	0.000025	0.21	856	1239	-0.97
BGM29. 2. 29	208	0.0486	0.0012	0.282717	-1.95	0.000031	2.45	763	1089	-0.96
BGM29. 2. 30	210	0.0604	0.0014	0.282667	-3.72	0.000026	0.69	838	1203	-0.96
BGM29. 2. 31	222	0.0486	0.0014	0.282613	-5.64	0.000030	-0.96	914	1317	-0.96
BGM29. 2. 32	208	0.0305	0.0008	0.282674	-3.48	0.000025	0.98	815	1183	-0.98

线。 δEu 变化范围分别为 0.63 ~ 0.76、0.55 ~ 0.70 和 0.53 ~ 0.57 范围内,显示明显负异常。

原始地幔标准化的微量元素蜘蛛图(图 6b)上,黑云辉石正长岩、黑云母正长岩和正长斑岩均显示富集 Rb、Ba、U、Th、Pb 等大离子亲石元素,其富集程度相当于原始地幔的数百倍,而 Nb、Ta、Ti 等高场强元素亏损,其中 Nb、Ta 亏损尤其明显。

4.4 锆石 Hf 同位素

锆石具有很高的 Hf 同位素体系封闭温度,因而 Hf 同位素原位分析可以为岩浆演化提供重要的制约参数(Knudsen *et al.*, 2001; 吴福元等, 2007)。

黑云辉石正长岩(BGM29-2) $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.282613 ~ 0.282763 之间(表 3), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 范围在 -0.96 ~ 4.32(图 7)之间,平均为 1.17,二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM}) 范围为 978 ~ 1317Ma;黑云母正长岩(BGM2) $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围为 0.282490 ~ 0.282757,根据锆石原位年龄校正计算后求得 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 在 -5.65 ~ 4.12 之间,平均为 -2.1,二阶段 Hf 模

式年龄(t_{DM})变化于 998 ~ 1611Ma 之间。

5 讨论

5.1 甯哥正长岩的成因及源区特征

Harker 图解清晰显示(图 8),黑云辉石正长岩、黑云母正长岩和正长斑岩中 MgO、TiO₂、CaO、P₂O₅ 随 SiO₂ 含量增加而线性降低,Al₂O₃ 含量随 SiO₂ 增加而增加。SiO₂ 含量与其它主量元素的相关性,意味着三者为同源岩浆演化的产物。其中相对贫硅的黑云辉石正长岩和黑云母正长岩 Rb/Sr 比值为 0.14 ~ 0.21,具有较高的 Cr($55.5 \times 10^{-6} \sim 106 \times 10^{-6}$) 和 Ni($20.3 \times 10^{-6} \sim 32.6 \times 10^{-6}$),Mg[#] 在 26.8 ~ 47.9 间,Zr/Nd 比值集中在 10 左右,显示出幔源的特征。而相对富硅正长斑岩 Rb/Sr 值为 0.28 ~ 0.71, Mg[#] 为 20.3 ~ 27.6, Co($3.50 \times 10^{-6} \sim 6.67 \times 10^{-6}$)、Cr($9.21 \times 10^{-6} \sim 20.1 \times 10^{-6}$) 和 Ni($3.07 \times 10^{-6} \sim 9.26 \times 10^{-6}$),含量明显低于上述二者,这可能是由于在岩浆结晶分异形成较酸性组分过程中单斜辉石

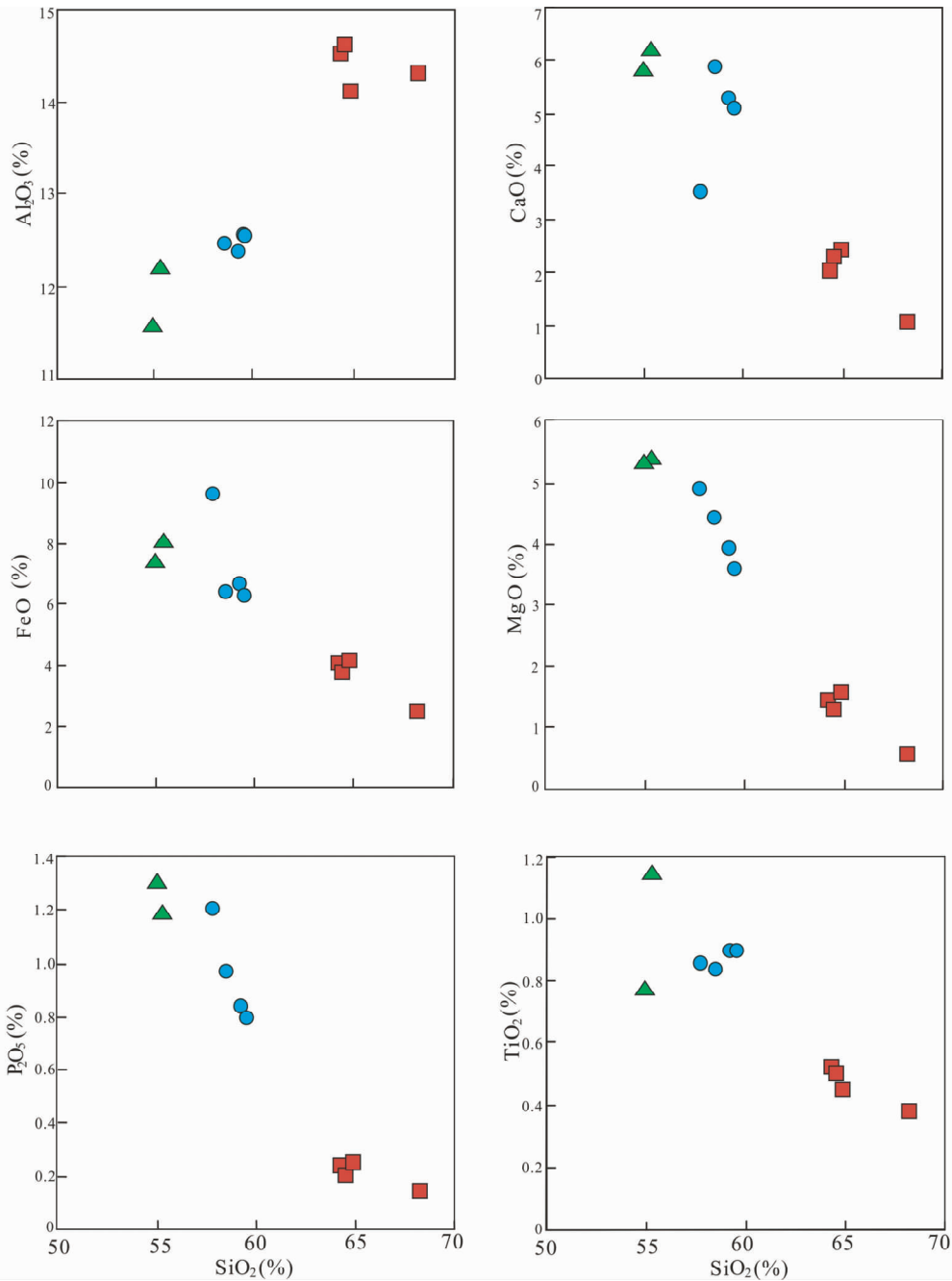


图8 甬哥岩体 Harker 图解

Fig. 8 Harker plot of the Bengge complex pluton

分离结晶所致。与同属印支期的普朗复式岩体和红山复式岩体相比,甬哥岩体具有低 Al_2O_3 高 K_2O 、 MgO 的特点。三类岩石稀土配分模式基本一致,黑云辉石正长岩和黑云母正长岩稀土元素含量略高于正长斑岩,进一步显示三者为同源岩浆的特点。原始地幔标准化微量元素图解显示,黑云辉石正长岩和黑云母正长岩富集 P 而正长斑岩亏损 P,这是由于磷灰石在岩浆结晶分异早期大量分离结晶所致。三类岩石稀土配分模式和原始地幔标准化微量元素趋势与中甸弧内同期中酸性侵入岩相似(图6),均显示出富集轻稀土和大离

子亲石元素而亏损高场强元素的特征,表明与其具有相类似的源区特征。

锆石 U-Pb 年代学研究显示黑云辉石正长岩和黑云母正长岩结晶年龄分别为 $213.8 \pm 2.2\text{Ma}$ 和 $219.1 \pm 4.7\text{Ma}$,二者在误差范围内属于同一阶段岩浆作用产物。综合来看,锆石年代学研究与元素地球化学特征均表明,甬哥黑云母正长岩、黑云辉石正长岩和正长斑岩体应属同源岩浆产物。

一般认为正长岩岩浆起源于:(1)有挥发份物质加入诱发地壳部分熔融或在封闭体系中一定压力下的加厚地壳部

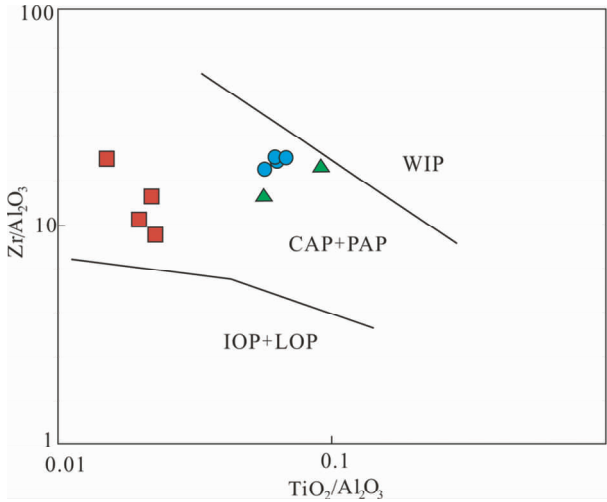


图9 甬哥岩体 Zr/Al_2O_3 - TiO_2/Al_2O_3 图(据 Müller *et al.*, 1992)

CAP-大陆弧; IOP-初始洋弧; LOP-晚期洋弧; PAP-后碰撞弧; WIP-板内

Fig. 9 Zr/Al_2O_3 vs. TiO_2/Al_2O_3 diagram of the Bengge pluton (modified after Müller *et al.*, 1992)

CAP-Continental Arc; IOP-Initial Oceanic Arc; LOP- Late Oceanic Arc; PAP- Postcollisional Arc; WIP-Winth-Plate

分熔融;(2)交代地幔部分熔融或碱性玄武岩浆分异的残余熔体;(3)基性和酸性熔浆的混合作用或幔源硅不饱和碱性岩浆和源自下地壳的花岗质岩浆的混合作用(Yang *et al.*, 2005)。黑云辉石正长岩和黑云母正长岩锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值范围分别为 $-0.96 \sim 4.32$ 和 $-5.65 \sim 4.12$, 绝大多数黑云辉石正长岩和少数黑云母正长岩 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为正值, 略高于义敦弧北部与俯冲沉积物有关的花岗岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值 ($-7.5 \sim -1.0$, Reid *et al.*, 2007; Peng *et al.*, 2014), 暗示岩浆源区有地幔物质的加入。正长岩强烈富集轻稀土和大离子亲石元素而亏损高场强元素的特征, 显示源区为受俯冲物质交代的富集地幔。二阶段 Hf 模式年龄 (978 ~ 1317Ma 和 998 ~ 1611Ma) 远大于结晶年龄, 结合从黑云母正长岩的部分锆石中获得 510 ~ 534Ma、598 ~ 945Ma 和 1096 ~ 1206 三组晚古生代-元古代的年龄信息, 暗示源区有壳源物质的混染(吴福元等, 2007), 推测为义敦弧古老地壳物质(Reid *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2011; Leng *et al.*, 2014)。

5.2 构造背景

前已述及, 从大地构造位置来看, 甬哥岩体出露于特提斯-喜马拉雅构造域玉树-义敦弧之南端的中甸弧内, 黑云辉石正长岩、黑云母正长岩和正长斑岩均具有富集大离子亲石元素, 明显亏损高场强元素的地球化学特征, 一致显示了俯冲环境下典型的弧岩浆的特点。Müller *et al.* (1992) 根据钾质火山岩的主量和微量元素的差异, 进一步将钾玄岩类岩石的大地构造环境划分为大陆弧、后碰撞弧、初始洋弧、晚期洋

弧和板内环境 5 种类型, 在 Zr/Al_2O_3 - TiO_2/Al_2O_3 图解中(图 9), 甬哥正长岩的样品点均落入陆缘弧和后碰撞弧区域, 结合该区正长岩普遍具有富碱、特别是富钾 ($K > 6\%$) 低 Ti ($< 1\%$) 的特征, 可以确定甬哥黑云辉石正长岩、黑云母正长岩和正长斑岩产出的构造环境与陆缘弧有关。

碱性岩一般被认为形成于后造山带, 裂谷或板内环境等拉张构造作用中(Bonin, 1990; Bonin *et al.*, 1998; Black and Liegeois, 1993; Nédélec *et al.*, 1995)。在晚三叠世晚期, 甘孜-理塘洋闭合并开始小规模的弧(义敦弧)-陆(扬子板块)碰撞(李文昌, 2007), 潜没的大洋板片仍在后续俯冲并发生断离拆沉(Wang *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2014), 使得软流圈物质上涌, 弧后区出现张应力场。甬哥正长岩即是此期拉张作用岩浆活动的响应。

综合以上分析, 可以对甬哥黑云辉石正长岩、黑云母正长岩和正长斑岩的起源与成因模式作如下概括: 甘孜-理塘洋于晚三叠世中期开始向西侧的中甸地块俯冲, 随着甘孜-理塘洋向西的俯冲, 俯冲洋壳脱水流体交代岩石圈地幔, 同时甘孜-理塘洋板片发生断离, 在弧后区拉张作用下, 富集交代地幔减压熔融, 形成原始岩浆, 并在侵位上升的过程中被义敦弧古老的地壳物质混染, 最终形成现今出露的甬哥正长岩。

6 结论

(1) 甬哥地区黑云辉石正长岩和黑云母正长岩锆石 U-Pb 年龄分别为 219.1 ± 4.7 Ma 和 213.8 ± 2.2 Ma, 与中甸弧内印支期甘孜-理塘洋向西俯冲作用晚期时限一致。

(2) 甬哥地区黑云辉石正长岩、黑云母正长岩及正长斑岩主量元素均具有高钾富碱的特征, 属于钾玄质系列, 具有高的 $Mg^\#$ 、 Zr/Nd 比值以及 Cr 和 Ni 含量, 在稀土元素地球化学方面具有富集 LREE 和大离子亲石元素, 亏损高场强元素的特征, 显示岩浆来自俯冲板片交代的富集地幔的特征。绝大多数黑云辉石正长岩和少数黑云母正长岩锆石具有正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值, 二阶段 Hf 模式年龄明显小于结晶年龄, 表明岩浆的源区有地幔物质, 且受到壳源物质的混染。

(3) 甬哥正长岩形成于晚三叠世甘孜-理塘洋向西俯冲作用晚期阶段, 甘孜-理塘大洋板片发生断离, 同时在弧后区出现张应力场的一种岩浆活动响应。

致谢 在文章写作的过程中得到了中国地质大学(北京)莫宣学老师、喻学惠老师、和文言师兄以及中国地质科学院地质研究所杨天南研究员等的指导和帮助; 同时承蒙审稿人的认真审阅, 为本文提出了宝贵的修改意见; 在此一并深表感谢!

References

Black R and Liegeois JP. 1993. Cratons, mobile belts, alkaline rocks

- and continental lithospheric mantle: The Pan-African testimony. *Journal of the Geological Society*, 150(1): 89–98
- Bonin B. 1990. From orogenic to anorogenic settings: Evolution of granitoid suites after a major orogenesis. *Geological Journal*, 25(3–4): 261–270
- Bonin B, Azzouni-Sekkal A, Bussy F and Ferrag S. 1998. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: Petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 45(1–4): 45–70
- Burchfiel BC and Chen ZL. 2012. Tectonics of the southeastern Tibetan Plateau and its adjacent foreland. USA: The Geological Society of America, 1–225
- Cao DH, Wang AJ, Xiu QY, Yang YQ and Li RP. 2007. Geochemical characteristics of Bengge syenites in the Zhongdian area, Yunnan Province and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 995–1003 (in Chinese with English abstract)
- Chen JL, Xu JF, Ren JB, Huang XX and Wang BD. 2014. Geochronology and geochemical characteristics of Late Triassic porphyritic rocks from the Zhongdian arc, eastern Tibet, and their tectonic and metallogenic implications. *Gondwana Research*, 26(2): 492–504
- Deng J, Wang QF, Li GJ, Li C and Wang CM. 2014a. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China. *Gondwana Research*, 26(2): 419–437
- Deng J, Wang QF, Li GJ and Santosh M. 2014b. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China. *Earth-Science Reviews*, 138: 268–299
- Deng J and Wang QF. 2015. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework. *Gondwana Research*, doi:10.1016/j.gr.2015.10.003
- Geng JZ, Li HK, Zhang J, Zhou HY and Li HM. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508–1513 (in Chinese with English abstract)
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62
- Hou ZQ, Yang YQ, Qu XM, Huang DH, Lü QT, Wang HP, Yu JJ and Tang SH. 2004. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjiang region, China. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 109–120 (in Chinese with English abstract)
- Huang XX, Xu JF, Chen JL and Ren JB. 2012. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of two periods of intermediate-acid intrusive rocks from Hongshan area in Zhongdian arc. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1493–1506 (in Chinese with English abstract)
- Knudsen TL, Griffin W, Hartz E, Andresen A and Jackson S. 2001. In-situ hafnium and lead isotope analyses of detrital zircons from the Devonian sedimentary basin of NE Greenland: A record of repeated crustal reworking. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(1): 83–94
- Leng CB, Zhang XC, Wang SX, Qin CJ, Gou TZ and Wang WQ. 2008. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Songnuo ore-hosted porphyry, Zhongdian, Northwest Yunnan, China and its Geological Implication. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 124–130 (in Chinese with English abstract)
- Leng CB, Zhang XC, Hu RZ, Wang SX, Zhong H, Wang WQ and Bi XW. 2012. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on the genesis of the Xuejiping porphyry copper deposit in Zhongdian, Northwest Yunnan, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 31–48
- Leng CB, Huang QY, Zhang XC, Wang SX, Zhong H, Hu RZ, Bi XW, Zhu JJ and Wang XS. 2014. Petrogenesis of the Late Triassic volcanic rocks in the Southern Yidun arc, SW China: Constraints from the geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes. *Lithos*, 190–191: 363–382
- Li JK, Li WC, Wang DH, Lu YX, Yin GH and Xue SR. 2007. Re-Os dating for ore-forming event in the late of Yanshan Epoch and research of ore-forming regularity in Zhongdian arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2415–2422 (in Chinese with English abstract)
- Li WC. 2007. The tectonic evolution of the Yidun island arc and the metallogenic model of the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan, SW China. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese)
- Lin QC, Xia B and Zhang YQ. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the syn-collisional Xuejiping quartz diorite porphyrite in Zhongdian, Yunnan, China, and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 25(1–2): 133–137 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1–70
- Mo XX, Lu FX, Shen SY *et al.* 1993. Volcanism and Metallogenesis of Sanjiang Tethy. Beijing: Geological Publishing House, 1–267 (in Chinese)
- Müller D, Rock NMS and Groves DL. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: A plot study. *Mineralogy and Petrology*, 46(4): 259–289
- Nédélec A, Stephens EW and Fallick AE. 1995. The Panafrican stratoid granites of Madagascar: Alkaline magmatism in a post collisional extensional setting. *Journal of Petrology*, 36(5): 1367–1391
- Peng TP, Zhao GC, Fan WM, Peng BX and Mao YS. 2014. Zircon geochronology and Hf isotopes of Mesozoic intrusive rocks from the Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: Petrogenesis and their bearings with Cu mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 80: 18–33
- Reid A, Wilson CJL, Shun L, Pearson N and Belousova E. 2007. Mesozoic plutons of the Yidun arc, SW China; U/Pb geochronology and Hf isotopic signature. *Ore Geology Reviews*, 31(1–4): 88–106
- Ren JB, Xu JF, Chen JL, Zhang SQ and Liang HY. 2011a. Geochemistry and petrogenesis of Pulang porphyries in Sanjiang region. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 581–592 (in Chinese with English abstract)
- Ren JB, Xu JF and Chen JL. 2011b. Zircon geochronology and geological implications of ore-bearing porphyries from Zhongdian arc. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2591–2599 (in Chinese with English abstract)
- Roger F, Jolivet M and Malavieille J. 2008. Tectonic evolution of the Triassic fold belts of Tibet. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2–3): 180–189
- Roger F, Jolivet M and Malavieille J. 2010. The tectonic evolution of the Songpan Garzê (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to present: A synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 254–269
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Wang BQ, Zhou MF, Li JW and Yan DP. 2011. Late Triassic porphyritic intrusions and associated volcanic rocks from the Shangri-La region, Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: Adakitic magmatism and porphyry copper mineralization. *Lithos*, 127(1–2): 24–38
- Wang SX, Zhang XC, Leng CB, Qin CJ, Ma DY and Wang WQ. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Pulang porphyry copper deposit, northwestern Yunnan, China: The ore-forming time limitation and geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2313–2321 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract)
- Xue CD, Luo SY, Song YC, Yang ZM, Han YW, Huang QH, Li J and Wei AY. 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its geological significance of Lujiacun quartz-monzonite porphyry in Shangri-La County, northwestern Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1845–1855 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Chung SL, Wilde SA, Wu FY, Chu MF, Lo CH and Fan HR.

2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214(1-2): 99-125
- Yang TN, Hou ZQ, Wang Y, Zhang HR and Wang ZL. 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic tectonic evolution of northeast Tibet: Evidence from the Triassic composite western Jinsha-Garzê-Litang suture. *Tectonics*, 31(4): TC4004, doi: 10.1029/2011TC003044
- Yang TN, Ding Y, Zhang HR, Fan JW, Liang MJ and Wang XH. 2014. Two-Phase subduction and subsequent collision defines the Paleotethyan tectonics of the southeastern Tibetan Plateau; Evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry, and structural geology of the Sanjiang orogenic belt, Southwest China. *Geological Society of America Bulletin*, 126(11-12): 1654-1682
- Yang XT. 2012. Geological characteristics and genesis discussion of the Chundu porphyry Cu deposit, Zhongdian, Yunnan Province. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese)
- Yang YQ, Hou ZQ, Huang DH and Qu XM. 2002. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian Arc. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 17-24 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Günther D and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by Laser Ablation-Inductively coupled Plasma-Mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353-370
- Zeng PS, Mo XX, Yu XH and Lu ZQ. 1999. Preliminary research on the intermediate-acidic porphyries and their ore-bearing in Zhongdian area, Northwest Yunnan. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(Suppl.): 359-366 (in Chinese with English abstract)
- Zeng PS, Li H, Luo XM and Yang WG. 2000. The prospecting of Cu-Au in Zhongdian, northwest of Yunnan. *Gold Geology*, 6(3): 13-18 (in Chinese with English abstract)
- Zeng PS, Mo XX, Yu XH, Hou ZQ, Xu QD, Wang HP, Li H and Yang CZ. 2003. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian area, northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 22(4): 393-400 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ND, Cao YW, Liao YA, Zhao Y, Zhang HJ, Hu DQ, Zhang R and Wang LZ. 1998. *Geology and Metallogeny in Garze-Litang Rift Zone*. Beijing: Geological Publishing House, 1-119 (in Chinese)
- (5): 1493-1506
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 秦朝建, 苟体忠, 王外全. 2008. 滇西北中甸松诺含矿斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义. *大地构造与成矿学*, 32(1): 124-130
- 李建康, 李文昌, 王登红, 卢映祥, 尹光侯, 薛顺荣. 2007. 中甸弧燕山晚期成矿事件的 Re-Os 定年及成矿规律研究. *岩石学报*, 23(10): 2415-2422
- 李文昌. 2007. 义敦岛弧构造演化与普朗超大型斑岩铜矿成矿模型. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 林清茶, 夏斌, 张玉泉. 2006. 云南中甸地区雪鸡坪同碰撞石英闪长玢岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义. *地质通报*, 25(1-2): 133-137
- 莫宣学, 路凤香, 沈上越等. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1-267
- 任江波, 许继峰, 陈建林, 张世权, 梁华英. 2011a. “三江”地区中甸弧普朗成矿斑岩地球化学特征及其成因. *岩石矿物学杂志*, 30(4): 581-592
- 任江波, 许继峰, 陈建林. 2011b. 中甸岛弧成矿斑岩的锆石年代学及其意义. *岩石学报*, 27(9): 2591-2599
- 王守旭, 张兴春, 冷成彪, 秦朝建, 马德云, 王外全. 2008. 滇西北普朗斑岩铜矿锆石离子探针 U-Pb 年龄: 成矿时限及地质意义. *岩石学报*, 24(10): 2313-2321
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185-220
- 薛传东, 骆少勇, 宋玉财, 杨志明, 韩艳伟, 黄琴辉, 李敬, 魏爱英. 2010. 滇西北中甸陆家村石英二长斑岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义. *岩石学报*, 26(6): 1845-1855
- 杨宪涛. 2012. 云南中甸春都斑岩铜矿床地质特征及矿床成因讨论. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大
- 杨岳清, 侯增谦, 黄曲豪, 曲晓明. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统. *地球学报*, 23(1): 17-24
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 卢振权. 1999. 滇西北中甸地区中-酸性斑岩及其含矿性初步研究. *地球学报*, 20(增刊): 359-366
- 曾普胜, 李红, 罗锡明, 杨伟光. 2000. 滇西北中甸地区的铜金找矿远景. *黄金地质*, 6(3): 13-18
- 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 侯增谦, 徐启东, 王海平, 李红, 杨朝志. 2003. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿. *矿床地质*, 22(4): 393-400
- 张能德, 曹亚文, 廖远安, 赵勇, 张怀举, 胡道清, 张睿, 王林彰. 1998. 四川甘孜-理塘裂谷带地质与成矿作用. 北京: 地质出版社, 1-119

附中文参考文献

- 曹殿华, 王安建, 修群业, 杨岳清, 李瑞萍. 2007. 中甸地区甬哥正长岩地球化学特征及其地质意义. *地质学报*, 81(7): 995-1003
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 周红英, 李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. *地质通报*, 30(10): 1508-1513
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 黄曲豪, 吕庆田, 王海平, 余金杰, 唐绍华. 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统. *地质学报*, 78(1): 109-120
- 黄肖潇, 许继峰, 陈建林, 任江波. 2012. 中甸岛弧红山地区两期中酸性侵入岩的年代学、地球化学特征及其成因. *岩石学报*, 28